

ГАЗОДИНАМИКА СЛОЯ ИЗ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

Аннотация

Рассмотрены сложности в определении газодинамических характеристик при термообработке слоя из железорудных окатышей, связанные со значительным изменением структуры слоя. Отмечено, что аналитическое решение уравнений движения газа через плотный слой невозможно в связи с изменением плотности слоя в процессе обжига. Показано, что определяющим параметром слоя, от которого зависят все его геометрические характеристики является порозность. Рассмотрены факторы, влияющие на плотность упаковки слоя, а следовательно, и на величину порозности. Дано обоснование применимости формул, которые могут быть использованы при расчете газодинамического сопротивления слоя. Отмечено, что в связи с большим набором расчетных формул наибольший интерес представляют не абсолютные результаты, полученные по ним, а способность с помощью их анализировать влияние различных факторов на газодинамику слоя. Результаты работы представляют определенный интерес и могут быть использованы при оптимизации газодинамических и тепловых режимов обжига железорудных окатышей на машинах конвейерного типа с получением качественного продукта.

Ключевые слова: *слой, железорудные окатыши, порозность, газодинамическое сопротивление, формулы, усадка, геометрические характеристики, модели, диаметр, высота, структура, факторы, коэффициент сопротивления.*

Abstract

Complexities in the determination of gas dynamic characteristics during heat treatment of a layer of iron ore pellets due to a significant change in the structure of the layer are considered. It is noted that an analytical solution of the equations of gas motion through a dense layer is impossible in connection with a change in the layer density during the firing process. It is shown that porosity is the defining parameter of the layer on which all its geometric characteristics depend. Factors affecting the packing density of the layer, and, consequently, also on the porosity value are considered. The validity of the applicability of formulas that can be used to calculate the gas-dynamic resistance of a layer is given. It is noted that in connection with a large set of calculation formulas, the greatest interest is not the absolute results obtained from them, but the ability to analyze the influence of various factors on the gas dynamics of the layer by means of them. The results of the work are of some interest and can be used to optimize the gas-dynamic and thermal modes of calcining iron ore pellets on conveyor-type machines to produce a high-quality product.

Key words: *layer, iron ore pellets, porosity, gas-dynamic resistance, formulas, shrinkage, geometric characteristics, models, diameter, height, structure, factors, coefficient of resistance.*

Разработка любых методов расчета процессов в плотном слое осложнена как методическими трудностями определения тех или иных параметров, так и интерпретацией полученных экспериментальных данных в связи с большим их разбросом, обусловленным принципиальной неповторяемостью опытных данных. Эти обстоятельства связаны со структурой плотного слоя, в котором число частиц в единице объема недостаточно велико, и поэтому флуктуации тех или иных характеристик структуры слоя играют большую роль. Естественно, что в

этих условиях и методы осредненного теоретического описания более грубые по сравнению, например, с объектами кинетической теории газов, в которой усредненные характеристики хаотического движения молекул подчиняются определенным законам. Поэтому всегда существует немалая вероятность того, что действительные локальные параметры слоя будут заметно отличаться от вычисленных средних. Это требует при газодинамических расчетах слоя и дальнейшем выборе тягодутьевых устройств введения определенного запаса прочности [1-6].

Таким образом, газодинамическая теория плотного слоя принципиально не может быть точной, в отличие от газодинамики в трубах. Подтверждением этому служат наличие многочисленных расчетных формул (только для газодинамического сопротивления их более сотни), справедливых только для тех условий, в которых они получены. Поэтому на основе физических представлений о структуре плотного слоя и экспериментальных данных с учетом разработок других исследователей желательно получить достаточно простую и универсальную зависимость сопротивления слоя окатышей от структурных характеристик слоя, которую с определенной степенью точности можно использовать в инженерных расчетах.

Экспериментальное определение сопротивления плотного слоя ΔP при движении через него газа относительно просто. Поэтому число экспериментальных данных по определению перепада давления в слое очень велико. Однако для обобщения полученных результатов существенно, чтобы при замере ΔP и расходе газа фиксировались также основные геометрические характеристики слоя: порозность m , размер элементов слоя d , поверхность слоя на единицу объема и др. Недостаток такой информации ведет к тому, что данные различных авторов значительно отличаются.

Так как точное аналитическое решение уравнений движения газа сквозь плотный слой практически неосуществимо в связи, например, с появлением в слое флуктуаций плотности, поэтому для теоретического вывода зависимости перепада давления ΔP от скорости потока, физических свойств газа и геометрических характеристик используют весьма идеализированные модели структуры слоя: система каналов и ансамбля частиц. По канальной модели течение газа в зернистом слое, состоящем из шаров одинакового диаметра, происходит через сеть извилистых каналов, аналогично течению в трубе, диаметр которых одинаков.

По модели ансамбля частиц течение газов рассматривается как обтекание системы шаров одинакового диаметра.

Наиболее полно анализ обеих моделей рассмотрен в работе [7-8].

Независимо от модели расчета сопротивление плотного слоя при вязком течении газа определяется формулой, называемой уравнением Козени-Кармана:

$$\frac{\Delta P}{h} = 36K \frac{(1 - m)^2 \mu v}{m^3 d^2}, \quad (1)$$

где h – высота слоя, K – константа Козени-Кармана.

Теоретическое значение константы определяется из выражения

$$K = K_0 \left(\frac{\ell}{\ell_0} \right)^2, \quad (2)$$

где K_0 – коэффициент, определяемый формой канала.

По экспериментальным данным, рассмотренным в работе [7-8], для слоя из сферических частиц $K = 4,55$.

В инерционном (турбулентном) режиме течения газа, когда при больших скоростях потока сопротивление слоя не зависит от вязкости, выполняется зависимость

$$\frac{\Delta P}{h} = 36K_{\text{и}} \frac{6}{d} \frac{1-m}{m^3} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3)$$

где $K_{\text{и}}$ – коэффициент, определяемый в чисто инерционном режиме. Для слоя из сферических частиц $K_{\text{и}} \approx 0,45$ [7-8].

В промежуточной переходной области, когда влияют вязкостные и инерционные силы, сопротивление зернистого слоя лучше всего описывать двухчленным уравнением:

$$\frac{\Delta P}{h} = Av + Bv^2, \quad (4)$$

где A – комплекс, определяющий вязкое течение; B – комплекс, определяющий инерционный режим.

Комплексы зависят от геометрии (диаметра, высоты) и структуры (удельная поверхность, порозность) слоя.

Используя формулы (1), (3) в соответствии с уравнением (4) получаем:

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{36K(1-m)^2\mu}{m^3d^2}v + \frac{3K_{\text{и}}(1-m)\rho}{m^3d}v^2. \quad (5)$$

Определяем комплексы:

$$A = \frac{36K(1-m)^2\mu}{m^3d^2}; B = \frac{3K_{\text{и}}(1-m)\rho}{m^3d}.$$

Численные значения после подстановки $K = 4,55$ и $K_{\text{и}} = 0,45$; $A_0 = 36K = 163,8$ и $B_0 = 3K_{\text{и}} = 1,35$.

Наиболее употребляемая в практических расчетах формула Эргана [9] дает эти коэффициенты, равными $A_0 = 150$ и $B_0 = 1,75$, тогда получаем значение $K = 4,17$ и $K_{\text{и}} = 0,58$.

Преобразуем двухчленное уравнение, отнеся первый член к скоростному напору:

$$\frac{\Delta P}{h} = \left[\frac{12K(1-m)}{Re} + K_{\text{и}} \right] \frac{6}{d} \frac{1-m}{m^3} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (6)$$

где соотношение $\zeta = \frac{12K(1-m)}{Re} + K_{\text{и}}$ представляет коэффициент сопротивления.

Если учесть, что эквивалентный критерий Рейнольдса в канальной модели связан с критерием Рейнольдса в модели ансамбля частиц соотношением $Re = 3/2 Re_3(1-m)$, то $\zeta_3 = 8K/Re_3 + K_{\text{и}}$. Отношение критериев Re_3/Re при изменении порозности от 0,25 до 0,45 возрастает от 0,89 до 1,21. Функция $\zeta(Re)$ является приближенной, так как коэффициенты K и $K_{\text{и}}$ определены эмпирически в предельных случаях вязкого или инерционного течения. Интерполяционный характер этой функции позволяет использовать ее в инженерных расчетах при фильтрации газа через слой для промежуточной области.

Авторы работы [7] для расчета сопротивления в слое из сферических частиц в области изменения $Re < 2000$ рекомендуют зависимость

$$\zeta_3 = \frac{36,4}{Re_3} + (0,45 \div 0,58), \quad (7)$$

или

$$\zeta_3 = \frac{54,6(1-m)}{Re} + (0,45 \div 0,58). \quad (8)$$

Повышенные значения $K_{и} = 0,58$ рекомендуются при более плотной укладке шаров, когда вместо кубической упаковки образуется ромбоэдрическая, что ближе к слою исходных окатышей.

Таким образом, для расчетов сопротивления при фильтрации газа через слой высотой h , состоящий из сферических частиц, рекомендуется выражение (5)

$$\Delta P = 6\zeta \frac{h}{d\psi} \frac{1-m}{m^3} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (9)$$

где ψ – коэффициент формы (для шара – $2/3$).

Из формулы (9) следует, что сопротивление слоя из сферических частиц, являющегося функцией скоростного напора $D = \rho v^2/2$ зависит еще от трех безразмерных комплексов.

Коэффициент сопротивления зависит от режима движения газа в слое

$$\zeta = \frac{324(1-m)}{Re} + 3,48 \quad (10)$$

и при $Re/(1-m) > 1000$ первым членом уравнения (10) можно пренебречь, когда $\zeta \rightarrow 3,48$.

Геометрический комплекс $\Gamma = h/d$ – определяет расстояние движения газа в слое шаров, на поверхности которых реализуются силы трения.

Структурный комплекс $\Sigma = (1-m)/m^3$ обуславливает влияние местных сопротивлений в слое, проявляющихся при изменении направления течения газа.

Таким образом, выражение (9) может быть записано в виде $\Delta P = \zeta \Gamma \Sigma D$, определяющим сопротивление слоя как произведение коэффициента сопротивления, геометрического и структурного комплекса и скоростного напора.

Помимо капиллярной модели и модели ансамбля шаров автор работы [10] предложил модель струйного обтекания частиц в плотном слое, сущность которого заключается в том, что шары данного ряда обтекаются струями, сформированными в промежутках между шарами предыдущего ряда. При достаточно больших числах Re сечение струй определяется минимальным проходным сечением ψ , которое в изотропном слое связано с порозностью выражениями:

$$\psi = 1,164(1-m)^{2/3} \quad \text{при} \quad 0,40 \leq m \leq 1,0; \quad (11)$$

$$\psi = 0,508 - 0,56(1-m) \quad \text{при} \quad m < 0,40. \quad (12)$$

На основании этой модели автор работы [10] предложил следующую формулу для определения газодинамического сопротивления слоя

$$\Delta P = \frac{3}{4} \zeta \frac{h}{d} \rho \frac{1-m}{m^3} \left(\frac{v}{\psi} \right)^2. \quad (13)$$

Необходимо отметить, что представленные уравнения получены при тех или иных допущениях и, как правило, для изотропных слоев. Для полидисперсных слоев, которые и изучены значительно меньше монодисперсных, применение указанных формул весьма затруднительно в связи со сложностью определения основных величин m, d, ψ .

Следовательно, существует набор расчетных формул, базирующихся на определенных модельных представлениях о течении газа в пористом слое. Поэтому интерес представляют не абсолютные результаты, полученные по этим формулам, а их способность достаточно достоверно отражать влияние тех или иных факторов на газодинамику слоя.

Список использованных источников

1. Брюханов О.Н., Коробко В.И., Мелик-Аракелян А.Т. Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 253 с.
2. Ртищев А.С. Теоретические основы гидравлики и теплотехники. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 171 с.
3. Стулов В.П. Лекции по газовой динамике. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 192 с.
4. Брюханов О.Н., Мелик-Аракелян А.Т. Основы гидравлики и теплотехники. – М.: Академия, 2011. – 240 с.
5. Гидравлический расчет трубопроводов и выбор тягодутьевых средств, обеспечивающих работу промышленных печей / С.Н. Гуцин, М.Д. Казяев, Е.В. Киселев, В.С. Шаврин, Б.П. Юрьев. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 140 с.
6. Schults H.J., Abel O. Durck Störmungsverhalten von Formkoks-Erz-Stückkoks-Systemen // Arch. Eisenhüttenwesen, 1974. В.45. No.5. S.279-285.
7. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.
8. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – М.: Химия, 1968. – 512 с.
9. Ergun S., Orning A.A. Ing. Eng. Chem., 1949. V. 41. P. 1179; Chem. Eng. Progr., 1952. V. 48. P. 227.
10. Киселев П.Г. Гидравлика: Основы механики жидкости. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.